

0-735679

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

НИКИФОРОВ ИГОРЬ ИВАНОВИЧ

**ПРОСТРАНСТВЕННО-КИНЕМАТИЧЕСКОЕ
И ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГАЛАКТИКИ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Агскаян Татсос Артемьевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Расторгуев Алексей Сергеевич

доктор физико-математических наук
Решетников Владимир Петрович

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

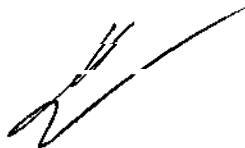
Защита состоится 5 июня 2003 г. в 14 ч. 00 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

< 15 апреля > 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Орлов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Моделирование нашей Галактики имеет фундаментальное значение для астрономии. Решение соответствующих модельных задач, в частности, дает значения базовых характеристик Галактики, определяет общие представления о ней и о ее месте среди других галактик, непосредственно затрагивает задачи внегалактической астрономии.

Математическое моделирование используется при исследовании различных свойств Галактики. Диссертация посвящена, в основном, двум видам моделирования — пространственно-кинематическому и динамическому. Под первым видом понимается нелокальное моделирование галактической кинематики совместно с установлением масштабного параметра — расстояния от Солнца до центра Галактики (R_0). В рамках этой темы основное внимание в работе уделяется проблеме адекватного описания вращения Галактики в связи с определением таких ее фундаментальных характеристик, как R_0 , постоянная Оорта A , инвариант AR_0 , peculiarное движение Местного стандарта покоя (МСП), линейная скорость МСП θ_{LSR} и кривая вращения (КВ) Галактики. Динамическое моделирование, выполняемое в работе, включает разложение полученной КВ на вклады галактических составляющих, определение параметров компонент, их масс и массы Галактики.

Проблемы, рассматриваемые в диссертации, в течение долгих лет остаются крайне актуальными. Одна из причин этого в том, что решение многих вопросов галактической и внегалактической астрономии и астрофизики требует знания упомянутых основных галактических характеристик и учета тесной взаимосвязи между ними. В частности, от *значения* R_0 зависят: абсолютный размер Галактики и ее светимость, величина θ_{LSR} ($= \omega_{\text{LSR}} R_0$, где ω_{LSR} — угловая скорость МСП), КВ Галактики (зависимость линейной скорости v от галактоцентрического расстояния L), кинематические гелиоцентрические расстояния; понимание природы галактического центра и решение ряда других задач. *Линейная скорость МСП* θ_{LSR} непосредственно влияет на галактическую КВ (вид последней критически зависит от θ_{LSR}), на решение пробле-

мы „темной материи“ в Местной группе галактик на результаты исследования распределения масс по локальным отклонениям от закона Хаббла. Закон вращения Галактики требуется для определения кинематических расстояний, для исследования распределения масс в Галактике, для определения ее массы и характеристик ее отдельных составляющих, для решения проблемы „темной материи“ в Галактике, для моделирования динамических эффектов, возмущающих осесимметричное вращение. Постоянные A и AR_0 , будучи параметрами закона вращения Галактики, влияют, явно или неявно, на те же задачи и, помимо этого, могут использоваться для того, чтобы косвенно найти другие галактические параметры. Учет некулярного движения МСП не только позволяет выполнить более точное кинематическое моделирование, но существенно влияет на решение таких сложных и важных проблем, как определение радиуса коротации в Галактике. В последней задаче, как и в ряде других, результат зависит сразу от нескольких галактических характеристик, подобно тому, как $KV \theta(R)$ зависит от принятой комбинации значений R_0 и θ_{LSR} .

Второй причиной сохранения высокой актуальности работ по моделированию Галактики с целью корректного определения ее основных характеристик является то, что многие проблемы, связанные с этой темой, несмотря на затраченные усилия, еще нельзя признать решенными в степени, удовлетворительной для большинства приложений.

Одной из таких проблем является нахождение расстояния до центра Галактики. Оценки R_0 , полученные с середины 70-х годов XX века, охватывают интервал от 6 до 10.5 кпк (см. обзоры Керра и Линден-Белла [9], Фиста [8], М.Дж. Рида [15,16], и И.Н. Рида [14]) В работах 90-х годов XX в. и более поздних разброс уменьшился, но все же остался значительным: от 6.5 до 9 кпк. Такое разногласие результатов вызывается не только их статистической неопределенностью, но и большими систематическими ошибками. Признанным источником последних являются погрешности шкал расстояний [8, 14, 16]. Понимание того, что систематика в проблеме R_0 далеко не сводится к таким погрешностям, начало складываться сравнительно недавно. Так, М.Дж. Рид в обзорах 1989 и 1993 гг. [15, 16] показал, что оценки R_0 , даже будучи приведенными к единой системе калибровок шкал расстояний, обнаружива-

ют статистически значимые и **большие** по амплитуде (до 1.5 кпк) систематические вариации со временем опубликования; такие вариации нельзя объяснить „эволюцией" калибровок. Этот результат демонстрирует масштаб влияния искажающих факторов иной природы. Один из них — наличие систематических ошибок самих методов определения До. Обычно основные усилия направляются на решение проблем уточнения шкал расстояний (особенно после появления каталога *Hipparcos* [14]), разработке абсолютных способов определения расстояний до далеких объектов, увеличению точности наблюдений и объемов выборок. При всей важности прогресса в этих направлениях, эффект от него может быть практически сведен на нет значительными систематическими ошибками методов анализа баз данных. Существенность таких ошибок осознана не до конца, для многих методов этот вопрос даже не поднимался. В комбинации с другим искажающим эффектом — психологической предрасположенностью исследователей к „правильному ответу" ("bandwagon effect") [15,16] — систематические ошибки методов и могут приводить к обнаруженным временным вариациям оценок R_0 . В основном из-за систематических факторов даже первая цифра значения До D° **сих пор** является общепризнанной, несмотря на большое количество его измерений.

Отношение к *постоянной Орта А*, как к характеристике локального (на $R \sim D_0$) вращения Галактики *в целом*, также требует некоторого пересмотра. Накапливающиеся данные позволяют поднять вопрос о систематическом различии (не связанном с ошибками калибровок шкал расстояний) наблюдаемых значений этого параметра для разных, даже плоских, подсистем Галактики, а также — на разных масштабах и при разном сглаживании данных для одной и той же подсистемы; есть зависимость и от модельных предположений о кинематике. Постоянная *А* может не иметь универсального численного значения, существование которого обычно молчаливо предполагается. Для разных задач корректными могут оказаться разные величины *А*, найденные по-разному. Сказанное верно и для комбинации AR_0 .

Вопрос о *пекулярном движении МСП*, введенном в рассмотрение относительно недавно [17], пока остается открытым в отношении как величины и направления этого движения, так и его интерпретации. Ясно лишь, что возможное существование этого

движения необходимо иметь в виду при любом моделировании, на результаты которого оно может повлиять. Оценивают радиальную и азимутальную компоненты движения МСП в плоскости Галактики — здесь $\Pi_{\text{LSR}} (l = 0^\circ)$ и $\Delta\theta_{\text{LSR}} (l = 90^\circ)$, соответственно.

Благодаря новым данным о различных объектах (например, о молекулярных облаках [7]), а также совершенствованию методов анализа кинематики нейтрального водорода по излучению в линии 21 см (работы И.В. Петровской и соавторов, 1986-1992, [1, 10, 12] и М. Меррифилда, 1992, [11]), закон *галактического вращения* стали получать с высокой внутренней точностью и для больших промежутков *галактоцентрических* расстояний, в том числе во внешней Галактике. Эти успехи сделали актуальными проблемы, которым ранее уделялось мало внимания. Появилась возможность ставить вопрос о реальности и интерпретации определенных деталей КВ и, вообще, вариаций скорости вращения и ее производной на разных масштабах. В некоторых задачах моделирования Галактики необходимость учета этих деталей представляется несомненной. Например, при пространственно-кинематическом моделировании изначальное предположение о совершенно плоской КВ Галактики уже трудно **считать** оправданным. Другой плохо изученный вопрос — насколько близки законы вращения для разных плоских подсистем Галактики и для разных масштабов усреднения. Это важно хотя бы потому, что есть методы моделирования, основанные на предположении о *полном* совпадении законов вращения, определенных по-разному. Неуниверсальность постоянной A и закона вращения Галактики — тесно связанные проблемы.

В случае *постоянной* θ_{LSR} принципиальной проблемой является отсутствие прямых способов ее измерения. Поэтому вряд ли стоит относиться к ней как к независимо определяемому параметру, как часто делают при моделировании Галактики. Если существует пекулярное движение МСП в азимутальном направлении, то правильнее было бы не отождествлять, как обычно, скорость вращения МСП (θ_{LSR}) со скоростью галактической подсистемы на $R = R_0 (\theta_0)$.

Тема изучения распределения масс в Галактике имеет обширную литературу (см. обзоры в [3, 5, 6]). Однако задача детального моделирования КВ почти не рассматривалась. Обыч-

ным подходом остается воспроизведение лишь общего тренда зависимости $\theta(R)$ и игнорирование систематических отклонений наблюдений от КВ, предсказываемой динамической моделью. Оценивание параметров модели, как правило, низко формализовано; строгая задача оптимизации не решается.

Наконец, общим слабым местом многих работ по моделированию Галактики является их **некомплексность**. Проблемы моделирования тесно взаимосвязаны, между тем, они зачастую рассматриваются изолированно, и это приводит, в частности, к необоснованному использованию результатов других исследований. Нередко учитывают не все сопоставимые по величине эффекты, влияющие на задачу.

Цель и задачи работы

Цель диссертации — выполнить пространственно-кинематическое и динамическое моделирование Галактики по данным о ее газовой составляющей, учитывая слабые стороны традиционных подходов. Рассматриваются две подсистемы — нейтрального водорода и молекулярных облаков (МО). Они имеют одни из самых низких значений дисперсии скоростей среди дискового населения, и данные о их кинематике представляют весь диск или большую его часть (по радиусу — в случае МО, по радиусу и по азимуту — в случае НІ). Одной из задач диссертации является исследование систематических факторов, помимо ошибок калибровок шкал расстояний или проблемы их неоднородности, влияющих на результаты решения задач нахождения галактических характеристик, а также — определение направлений совершенствования алгоритмов моделирования. Вторая задача — моделирование кинематики газовых подсистем совместно с определением R_0 в рамках осесимметричной схемы галактического вращения. Здесь используются два подхода: анализ данных об однородной галактической подсистеме и метод сопоставления с данными о вращении НІ. В эту же задачу входит получение системы взаимосогласованных галактических постоянных, построение КВ Галактики, изучение вопроса о совпадении законов вращения подсистем НІ и МО. Третья задача состоит в детальной интерпретации полученной КВ в рамках моделей, допускающих резкие падения плотности в галак-

тическом диске. Задача включает построение модели распределения масс в Галактике, определение параметров галактических составляющих и массы Галактики.

Научная новизна

Разработана новая трехмерная классификация измерений До, которая позволяет однозначно характеризовать оценку До одновременно в разных отношениях. В отличие от более ранних ранжированных одномерных классификаций предложенная классификация корректно отражает специфику ошибок разной природы в разных классах методов определения До и неоднозначность понятия „центр Галактики“.

Является новым алгоритм выбора допустимых порядков кинематической модели, позволяющий существенно снизить систематические ошибки До вследствие нереалистичности модели. Все применяемые в диссертации методы используют этот алгоритм. Ранее подобная оптимизация сглаженности модели при кинематическом оценивании До не применялась.

В классе методов определения До способом сопоставления с вращением НІ разработаны новые методы, основанные на отказе от традиционных предположений, порождающих систематические ошибки: в предложенных методах закон вращения по НІ не рассматривается как известный точно, не фиксируется жестко модель вращения, законы вращения НІ и подсистемы опорных объектов (по гелиоцентрическим расстояниям до которых находится До) не считается полностью совпадающими. Последняя особенность новых методов наиболее существенна — ранее во всех работах эти законы считались в точности совпадающими, что приводило к большим систематическим смещениям оценки R_0 .

По результатам применения предложенных методов найдена новая кинематическая оценка До по МО: $До = 8.2 \pm 0.7$ кпк.

На основе новых классификации и обзора измерений До получено новое решение задачи выведения „наилучшего“ значения этой постоянной по совокупности опубликованных результатов: $\langle R_0 \rangle_{best} = 7.9 \pm 0.2$ кпк.

Показана значимость различий между кривыми вращения НІ и МО. Для южных галактических долгот это различие обнаруже-

но впервые. По-видимому, область в III галактическом квадранте, где МО вращаются медленнее HI, представляет собой продолжение рукава Персея, которое ранее не было выявлено, т.к. оно, в отличие от II квадранта, приходится на общий подъем КВ.

Получена новая сглаженная КВ Галактики по МО и HI. В случае HI в целях повышения надежности результата использованы 6 серий данных, найденных разными методами.

Впервые построена динамическая модель Галактики, которая подробно воспроизводит КВ Галактики, в частности, такие ее детали, как прогиб и излом.

Научная и практическая ценность

Разработанные методы кинематического оценивания До могут быть применены к произвольным плоским подсистемам Галактики. Выведенная по МО оценка До, система галактических постоянных и кривые вращения для HI и МО могут служить для различных кинематических и динамических приложений, оценка До — также для нахождения „наилучшего“ значения R_0 . Предложенная классификация измерений До и сравнительный анализ ошибок в разных классах могут использоваться при совершенствовании методов определения R_0 . Алгоритм выведения $\langle R_0 \rangle_{\text{best}}$, основанный на этой классификации, может применяться в дальнейшем при обработке новых оценок До и сравнительного анализа различных групп оценок. Новое значение $\langle R_0 \rangle_{\text{best}}$ может использоваться во всех тех задачах, в которых До является входным параметром. Сопоставление с азимутально-усредненным вращением HI может быть полезным приемом при исследовании поля остаточных скоростей различных галактических подсистем с целью выяснения природы и установления характеристик некруговых движений в Галактике. Построенная динамическая модель Галактики может использоваться для теоретических исследований, для более подробного гидродинамического моделирования Галактики, для получения ограничений на количество темной материи в нашей звездной системе и для изучения кинематики различных объектов. На некоторых материалах диссертации основывались специальные практикумы по звездной астрономии в СПбГУ.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Кинематический метод определения R_0 , включающий оптимизацию сглаженности модели вращения, применимый к произвольной однородной плоской подсистеме объектов Галактики.
2. Методы определения R_0 способом сопоставления данных об опорных объектах с вращением подсистемы нейтрального водорода, в которых оптимизируется порядок модели вращения, закон вращения HI не рассматривается как известный точно и учитывается средний сдвиг между скоростями вращения опорных объектов и HI .
3. Итоговая кинематическая оценка $R_0 = 8.2 \pm 0.7$ кпк по молекулярным облакам (МО), выведенная в результате применения к этим объектам указанных выше методов. Согласованные с этой оценкой системы галактических постоянных и сглаженные кривые вращения по данным о МО и HI . В среднем для этих двух подсистем $AR_0 = 141 \pm 4$ км/с, $A = 17.2 \pm 0.5$ км/с/кпк. Показано наличие прогиба и излома на кривых вращения по МО и HI . Остаточное движение Местного стандарта покоя относительно МО: $\Delta\theta_{\text{LSR}} = 2.6 \pm 1.3$ км/с, $\Pi_{\text{LSR}} = -2.8 \pm 1.2$ км/с.
4. Обнаружение значимого различия между сглаженными кривыми вращения HI и МО во II и III галактических квадрантах.
5. Динамическая модель Галактики с резкими падениями плотности в диске, которая детально воспроизводит кривую вращения Галактики. Строгое решение задачи оптимизации при динамическом моделировании.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на Международной конференции „Математические методы изучения структуры и динамики гравитирующих систем“ (Петрозаводск, 1993 г.), на Втором общем собрании Европейского Астрономического Общества (Торунь, Польша, 1993 г.). на

Международной конференции в честь 600-летия Мирзо Улукбека (Ташкент, Узбекистан, 1994 г.), на Международной конференции „Структура и эволюция звездных систем" (Петрозаводск, 1995 г.), на Международной конференции „Динамика гравитирующих систем" (Умань, Украина, 1998 г.), на Всероссийской конференции „Астрофизика на рубеже веков" (Пушино, 1999 г.), на 174 коллоквиуме МАС „Малые группы галактик" (Турку, Финляндия, 1999 г.), на Международной конференции в честь 100-летия К.Ф. Огородникова „Звездная динамика: от классики к современности" (Санкт-Петербург, 2000 г.), на семинарах им. К.Ф. Огородникова по звездной астрономии (СПбГУ).

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 264 наименований. Общий объем диссертации — 197 страниц. Работа содержит 26 таблиц и 23 рисунка.

Содержание диссертации

Во Введении характеризуются виды моделирования Галактики, которым посвящена работа. Обосновывается актуальность и научная новизна темы. Кратко описываются нерешенные проблемы, связанные с определением галактических характеристик. Формулируются цель и задачи работы, указывается научная и практическая ценность ее результатов и выводов. Приводятся краткое содержание диссертации и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе выполняется сравнительный анализ существующих подходов при решении взаимосвязанных задач моделирования Галактики и определения ее характеристик — R_0 , КВ, A , AR_0 , θ_{LSR} , ω_{LSR} , параметров распределения масс. Рассматривается вопрос о физическом смысле этих характеристик, делается обзор методов их определения и полученных результатов, обсуждается влияние параметров друг на друга и в целом на результаты пространственно-кинематического и динамического моделирования Галактики, отмечаются нерешенные вопросы. Основное внимание уделено проблеме R_0 (раздел 1.1). Даются основные опре-

деления, связанные с этой проблемой. Анализируются источники ошибок при определении R_0 . Предлагается новая трехмерная классификация измерений До, однозначно характеризующая существующие и потенциальные измерения, исходя из специфики ошибок разных видов в разных подходах и различия определений понятия „центр Галактики”. Показано, что классификация с такими свойствами не может быть одномерной (иметь один определяющий признак). В новой классификации измерения До подразделяются независимо по трем признакам: 1) по типу собственно метода определения R_0 , т.е. анализа опорных расстояний (ОР), 2) по способу нахождения ОР и 3) по типу опорных объектов (ОО). В секциях 1.1.1-1.1.8 подробно рассматриваются отдельные классы измерений До, особое внимание уделяется анализу систематических ошибок собственно метода; приводятся сводки опубликованных оценок R_0 . Разработана детальная классификация для класса кинематических методов определения До (секция 1.1.2). Ошибки, связанные с областями Н II и подобными им объектами, использованными в диссертации в качестве ОО, детально рассмотрены в соответствующем пункте секции 1.1.7. В разделах 1.2-1.5 аналогично, но менее подробно, анализируются проблемы установления других галактических характеристик, даются краткие классификации методов их определения. В разделе 1.6 обсуждаются проблемы моделирования распределения масс в Галактике, связанные с задачами диссертации, приводится краткая классификация моделей. В конце главы сформулированы выводы общего характера о постановке задач моделирования и определения галактических характеристик (раздел 1.7). Введенные понятия и терминология и сделанные выводы используются в остальных главах диссертации.

Во второй главе выполняется пространственно-кинематическое моделирование на основе согласования с данными о вращении нейтрального водорода. В рамках этого подхода разработан и применен метод, основанный, в целях снижения систематических ошибок, на более общих предположениях по сравнению с другими работами: закон вращения по Н I не рассматривается как известный точно, не фиксируется жестко модель вращения или какое-то одно ее аналитическое представление со свободными коэффициентами. Вместо этого функция, аппроксимирующая закон

вращения, задается в виде отрезка ряда, число членов которого оптимизируется, наряду со свободными параметрами. С другой стороны, в этой главе сохраняется традиционное предположение, что отклонения ОО от **НІ-закона** носят случайный характер, т.е. что истинные КВ этих двух подсистем совпадают. В качестве ОО используются комплексы **НІ/СО**. Чтобы повысить надежность результатов, привлекаются данные о вращении **НІ**, полученные разными методами, в основном по полному профилю линии 21 см. Показано, что оптимизация сглаженности модельного закона вращения при использовании данных о диффузной газовой составляющей (**НІ**) возможна и позволяет практически однозначно определить как оптимальный порядок аппроксимирующего полинома, так и значение R_0 , соответствующее адекватному воспроизведению реального закона вращения. Вместе с тем, обнаружены признаки того, что принятое предположение о случайности отклонений от закона вращения **НІ** нельзя признать достаточно реалистичным для данной задачи. Это заставляет рассматривать результаты, полученные в второй главе, лишь как промежуточные. Объясняется ряд результатов, полученных в других работах в рамках сопоставления с вращением **НІ**.

В третьей главе на основании выводов первой и второй глав предложены общие правила разработки и совершенствовании методов пространственно-кинематического моделирования, позволяющие минимизировать систематические ошибки (раздел 3.1). В соответствии с этими правилами одним из направлений совершенствования является повышение адекватности представления закона дифференциального вращения — основной составляющей любой кинематической модели. В разделе 3.2 кинематические методы определения R_0 сравниваются в данном отношении. До сих пор наиболее совершенными были редкие работы, в которых использовались разные варианты избранной аналитической формы модельного закона вращения, в частности, разложения разных порядков [2, 4, 13]. Но и в этих случаях вопрос об оптимальности модели вращения не изучался или вообще не затрагивался. В разделе 3.3 разрабатывается кинематический метод определения R_0 , включающий оптимизацию сглаженности модели вращения (секция 3.3.3), применимый к произвольной однородной плоской подсистеме объектов Галактики. Предлагается унификация мас-

штаба доверительных интервалов параметров при помощи оценки средней ошибки единицы веса, позволяющая избежать субъективности при оценивании статистических ошибок в задачах с нелинейными параметрами (секция 3.3.2). Строится простой алгоритм исключения объектов с большими невязками, учитывающий объем выборки (секция 3.3.4). В разделе 3.4 описываются данные о молекулярных облаках (МО), излучающих в линиях СО и связанных с областями Н II или с отражающими туманностями; проверяется однородность шкал расстояний МО в разных источниках данных. В разделах 3.5 и 3.7 разработанный метод применяется к этим данным. При помощи численного моделирования показывается обоснованность алгоритма анализа, в частности, выбора допустимых порядков модели вращения (раздел 3.6). Обсуждается влияние азимутальной компоненты остаточного движения МСП на результаты кинематических определений До (секция 3.7.1). По данным BFS2/BBW обнаружено различие „север-юг" в оценках До (секция 3.7.2). Выводятся оценки До настоящим методом по данным каталогов МО BFS2 и BFS2/BBW (секция 3.7.3). В разделе 3.8 обсуждаются полученные КВ и оценки A по МО. В разделе 3.9 сравниваются полученные результаты и данные из литературы об остаточном движении МСП. Сделан вывод о том, что это движение нельзя считать универсальной галактической характеристикой локальной кинематики. В разделе 3.10 показано, что благодаря оптимизации порядка модели далекие объекты не искажают решение и сглаживают влияние локальных аномалий; обсуждаются некоторые детали метода. В разделе 3.11 разрабатывается и тестируется простой метод анализа остаточных скоростей, который может дать приблизительную оценку средней случайной ошибки расстояний в каталоге и скорректированное значение дисперсии скоростей.

В четвертой главе совершенствуется метод, предложенный во второй главе: разрабатываются (раздел 4.2) и применяются (раздел 4.3) методы сопоставления с вращением Н I, в которых МО и Н I рассматриваются как различные подсистемы, могущие иметь отличающиеся КВ. Предположена самая простая форма этого отличия — постоянный сдвиг между законами вращения МО и Н I. В этих методах используется тот же алгоритм выбора допустимых порядков кинематической модели, что в третьей гла-

Таблица 1. Оценки параметров галактического вращения по Н I и молекулярным облакам (МО)

Подсистема	AR_0 , км/с	Л, км/с/кпк	$\Delta\theta_{\text{LSR}}$, км/с	Π_{LSR} , км/с	θ_0 , км/с
МО и Н I	141.0 ± 4.0	17.20 ± 0.48	1.2 ± 1.3	—	215 ± 24
МО	155.1 ± 6.2	18.91 ± 0.76	2.6 ± 1.3	-2.8 ± 1.2	214 ± 24
Н I	130.0 ± 5.9	15.86 ± 0.72	-2.1 ± 3.7	—	219 ± 24
Разность МО - Н I	25.1 ± 8.6	3.05 ± 1.05	4.7 ± 3.9	—	-4.7 ± 3.9

ве. Поэтому предложенные методы дают оценки До с учетом как основных деталей закона галактического вращения, так и среднего сдвига между скоростями вращения подсистем МО и Н I. В разделе 4.3 этими методами получаются оценки R_0 по каталогам МО BFS2 и BFS2/BBW. Методы тестируются при помощи численных экспериментов. Выводится итоговая оценка $R_0 = 8.2 \pm 0.7$ кпк по МО на основе результатов этой и третьей глав. В разделе 4.4 находится согласованная система галактических постоянных по объединенным данным о МО и Н I и по отдельности для этих двух подсистем (табл. 1, здесь θ_0 — линейная скорость подсистемы на $R = R_0$). Строится КВ Галактики по МО и Н I (рис. 1). Выделяются наиболее надежные детали этой кривой: *прогиб* на $R \gtrsim R_0$, рост скорости во внешней Галактике и *излом* на $R \sim 14 \div 15$ кпк, где рост КВ прекращается. В разделе 4.5 анализируется различие между кривыми вращения подсистемы Н I и подсистемы МО (рис. 1). Показано, что это различие значимо, в том числе и при учете неопределенности полученной оценки До (секция 4.5.1). Предлагается возможная интерпретация различия „Н I-МО” как проявления спиральной волны плотности (секция 4.5.2). В разделе 4.6 на основе классификации измерений До и обзора, выполненного в первой главе, выводятся „наилучшая” оценка $\langle R_0 \rangle_{\text{best}} = 7.9 \pm 0.2$ кпк по совокупности результатов, имеющих в литературе. Объясняются расхождения в оценках До, полученных в других работах по областям Н II и объектам сходного типа (раздел 4.7).

Пятая глава посвящена детальному динамическому моделированию КВ Галактики, построенной в четвертой главе. Исследуется возможность детального воспроизведения этой кривой за счет допущения одного или двух резких падений плотности в галактическом диске. Устанавливается, какие параметры моде-

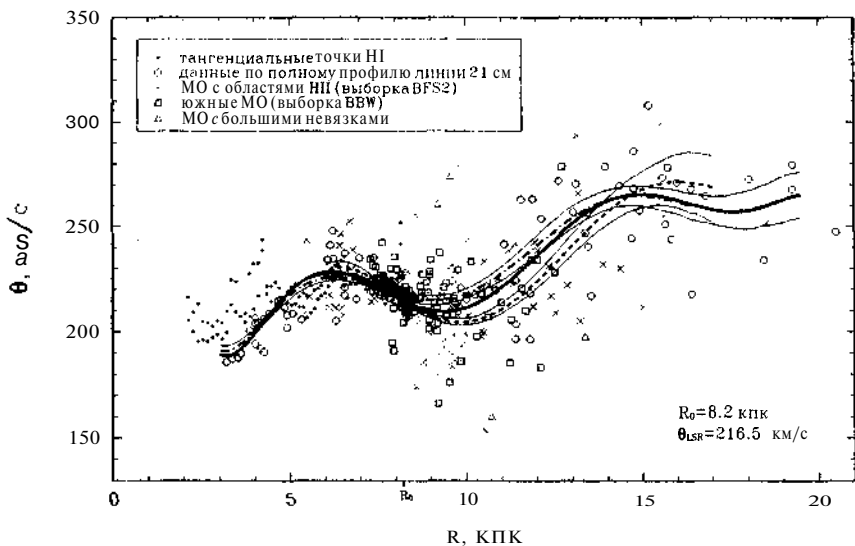


Рисунок 1. Кривая вращения Галактики по нейтральному водороду и молекулярным облакам (МО). Сглаженные кривые (полиномы оптимального порядка n_0): толстая сплошная линия — по всем данным ($n_0 = 7$), штрих-пунктирная линия — отдельно для подсистемы Н I ($n_0 = 7$), пунктирная линия -- отдельно для подсистемы МО ($n_0 = 5$). Тонкие сплошные линии ограничивают доверительные области для двух последних кривых (уровень значимости 1σ).

ли не могут быть найдены по КВ и должны **быть** зафиксированы. Остальные параметры (структурные и **плотностные**) определяются в результате строгого решения задачи оптимизации. Находятся производные параметры, в частности, массы компонент и масса Галактики. Оцениваются доверительные интервалы для свободных и производных параметров. Показано, что модель с двумя резкими падениями плотности в диске и с составным гало удовлетворительно воспроизводит детали наблюдаемой КВ, в частности, прогиб и излом (рис. 2). Устанавливается, что по КВ можно надежно определить радиусы, где заканчиваются резкие падения плотности в диске, но не радиусы начала падения. Обсуждаются взаимозависимости между основными параметрами модели.

В заключении суммированы **основные результаты и выводы!** работы, указаны возможные направления дальнейших исследований.

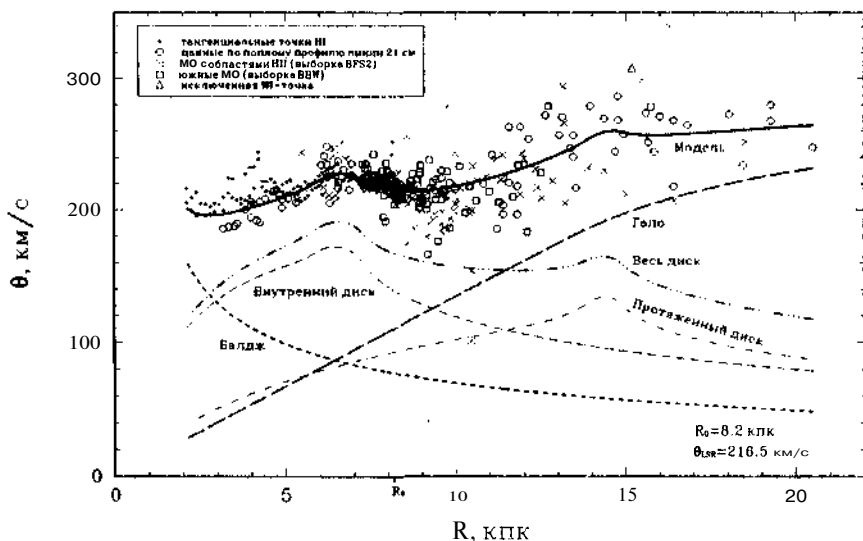


Рисунок 2. Кривая вращения Галактики для модели распределения масс с двумя резкими падениями плотности в диске. Компоненты модели: балдж (усеченный сфероид Хаббла), два усеченных диска (внутренний и протяженный), составное гало (внутреннее однородное и внешнее псевдо-изотермическое).

Основные результаты и выводы диссертации

1. Разработана открытая для дополнений трехмерная классификация измерений R_0 : 1) по типу собственно метода определения R_0 , т.е. анализа ОР, 2) по способу нахождения ОР и 3) по типу ОО. Классификация однозначно отображает специфику ошибок разных видов в разных подходах и различие определений понятия „центр Галактики“. Класс измерения R_0 определяет вероятные источники ошибок, принципиальные преимущества и недостатки метода и, следовательно, возможные направления его совершенствования.

2. Предложены общие правила разработки и совершенствования методов кинематического оценивания R_0 , имеющие целью минимизировать систематические ошибки: следует стремиться определять все параметры задачи совместно, используя как можно более однородные данные и избегая дополнительных (избыточных и упрощающих) предположений.

3. Разработан кинематический метод определения R_0 , включающий оптимизацию сглаженности модели вращения, применимый к произвольной однородной плоской подсистеме объектов Галактики. При помощи численного моделирования показана обоснованность алгоритма анализа, в частности, выбора допустимых порядков модели вращения.

4. Разработано два метода определения R_0 способом сопоставления данных об ОО и НІ. В этих методах, в отличие от традиционных, закон вращения по НІ не рассматривается как известный точно, оптимизируется порядок модели вращения и учитывается средний сдвиг между скоростями вращения ОО и НІ.

5. По результатам применения предложенных трех методов к данным о МО выведена итоговая оценка $R_0 = 8.2 \pm 0.7$ кпк. Для этого значения До получена согласованная система других галактических постоянных по объединенным данным о МО и НІ: $AR_0 = 141 \pm 4$ км/с, $A = 17.2 \pm 0.5$ км/с/кпк; $\theta_{\text{LSR}} = 216.5 \pm 24$ км/с, $vo = 215 \pm 24$ км/с (при $\omega_{\text{LSR}} = 26.4 \pm 1.9$ км/с/кпк).

6. Получено остаточное движение МСП относительно МО: $\Delta\theta_{\text{LSR}} = 2.6 \pm 1.3$ км/с, $\Pi_{\text{LSR}} = -2.8 \pm 1.2$ км/с. Азимутальную компоненту ($\Delta\theta_{\text{LSR}}$) не следует фиксировать при пространственно-кинематическом моделировании, поскольку ее величина не является универсальной характеристикой локальной кинематики и сильно влияет на оценку R_0 ,

7. Обнаружено значимое различие между сглаженными КВ НІ и МО во II и III галактических квадрантах. Предложена возможная интерпретация этого различия как проявления спиральной волны плотности. Получены согласованные системы галактических постоянных для подсистем НІ и МО по отдельности.

8. Определены оптимально-сглаженные КВ подсистем НІ и МО и средняя для двух подсистем. Наиболее значимые детали всех КВ — прогиб, последующий рост и излом.

9. На основе новой классификации измерений До и выполненного обзора выведена „наилучшая“ оценка $\langle R_0 \rangle_{\text{best}} = 7.9 \pm 0.2$ кпк по совокупности результатов, найденных в литературе.

10. Анализ остаточных лучевых скоростей, основанный на методе наименьших квадратов, может дать приблизительную оценку средней случайной ошибки расстояний в каталоге и скорректированную дисперсию скоростей лишь при умеренных относитель-

ных ошибках расстояний.

11. Построена динамическая модель Галактики, которая детально воспроизводит ее КВ, в основном, за счет допущения двух резких падений плотности в галактическом диске. Свободные параметры модели найдены в результате строгого решения задачи оптимизации. По КВ можно надежно определить радиусы, где заканчиваются резкие падения плотности в диске ($R_d = 7.2 \pm 0.2$ и $14.9^{+0.4}_{-0.6}$ кпк), но радиусы начала падения данными о вращении ограничиваются плохо. Излом КВ можно объяснить внешним усечением диска Галактики и наличием перехода на $R_h = 13 \pm 1$ кпк от однородного внутреннего гало к внешнему с быстрым падением плотности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. *Никифоров И.И., Петровская И.В.* Расстояние от Солнца до центра Галактики и кривая вращения по данным о кинематике нейтрального и ионизованного водорода // Астрон. журн. 1994. Т. 71. № 5. С. 725-736.
2. *Никифоров И.И.* Моделирование закона вращения плоской подсистемы и определение расстояния до центра Галактики: реалистичность модели и оптимизация ее сложности // Астрофизика. 1999. Т. 42. Вып. 3. С. 399-406.
3. *Никифоров И.И.* Моделирование закона вращения плоской подсистемы и определение расстояния до центра Галактики: анализ данных о газовых комплексах // Астрон. журн. 1999. Т. 76. № 6. С. 403-418.
4. *Nikiforov I.I.* Galactic constants and rotation from two kinematically distinguishable gaseous subsystems: HI and CO // Кинематика и физика неб. тел. Приложение. 1999. № 2. С. 34-40.
5. *Никифоров И.И.* Разложение на составляющие наблюдаемой дисперсии лучевых скоростей галактической подсистемы // Астрофизика. 2000. Т. 43. Вып. 3. С. 443-450.
6. *Nikiforov I.I.* Milky Way Rotation Models from Neutral Hydrogen and Molecular Clouds: Galactic Constants, Common Details and

- Differences // Small Galaxy Groups. IAU Colloquium 174 / Eds Valtonen M.J., Flynn C. ASP Conf. Series. 2000. V. 209. P. 403-407.
7. *Nikiforov I.I., Petrovskaya I.V., Ninkovic S.* Interpretation of Rotation Curves of Giant Galaxies in the Local Group with the Truncated Disk Model: the Milky Way // Small Galaxy Groups. IAU Colloquium 174 / Eds Valtonen M.J., Flynn C. ASP Conf. Series. 2000. V. 209. P. 399-402.
 8. *Никифоров И.И., Нинкович С., Петровская И.В.* Многокомпонентная модель Галактики с усеченной дисковой составляющей // Астрофизика на рубеже веков. Сборник трудов. / Ред. Кардашев Н.С., Дагкесаманский Р.Д., Ковалев Ю.А. М.: Янус-К, 2001. С. 228-232.
 9. *Nikiforov I.I.* Mass Distribution in the Disk of Our Galaxy // Stellar Dynamics: from Classic to Modern. Proc. of the International Conference held in Saint Petersburg, Russia, August 21-27, 2000, in honour of the 100th birthday of Professor K. F. Ogorodnikov (1900-1985) / Eds Ossipkov L.P., Nikiforov I.I. СПб: НИИХ СПбГУ, 2001. P. 28-31.

В статье Никифорова и Петровской (1994) соавтором подготовлен наблюдательный материал. Автору диссертации принадлежит метод определения R_0 и выполнение расчетов. Выбор формы представления закона вращения и интерпретация результатов выполнены совместно. В статьях Nikiforov, Petrovskaya, Ninkovic (2000) и Никифорова, Нинковича и Петровской (2001) первоначальная идея работы и предварительные вычисления принадлежат И.В. Петровской, вклады сфероидальных компонент в кривую вращения исследованы С. Нинковичем, автор диссертации выполнил основные расчеты, в том числе попытки оптимизации параметров модели. Разработка метода и интерпретация результатов проведены всеми авторами совместно.

Литература

1. *Герасимов А.Г., Петровская И.В.* // Кинематика и физика неб. тел. 1990. Т. 6. № 5. С. 17.

2. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С. // Письма в „Астрон. журн.” 1995. Т. 21. С. 331.
3. Кутузов С.А. // Методы построения моделей распределения масс в галактиках. Дис. ... доктора физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ, 1991. 296 с.
4. Никифоров И.И. // Вестник ЛГУ. 1990. Сер. 1. Вып. 4. С. 108.
5. Binney J., Merrifield M. Galactic Astronomy. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1998. 13+796 p.
6. Binney J., Tremaine S. Galactic Dynamics. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1994. 16+733 p.
7. Brand J., Blitz L. // Astron. and Astrophys. 1993. V. 275. P. 67.
8. Feast M.W. // The Galaxy. Proc. of a NATO Advanced Study Institute, held at Cambridge, UK, 4-15 August 1986 / Eds Gilmore G., Carswell B. Dordrecht: Reidel D., 1987. P. 1.
9. Kerr F.J., Lynden-Bell D. // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1986. V. 221. P. 1023.
10. Malahova Yu.N., Petrovskaya I. V. // Astron. and Astrophys. Trans. 1992. V. 1. P. 221.
11. Merrifield M.R. // Astron. J. 1992. V. 103. P. 1552.
12. Petrovskaya I.V., Teerikorpi P. // Astron. and Astrophys. 1986. V. 163. P. 39.
13. Pont F., Mayor M., Burki G. // Astron. and Astrophys. 1994. V. 285. P. 415.
14. Reid I.N. // Annual Rev. Astron. and Astrophys. 1999. V. 37. P. 191.
15. Reid M.J. // The Center of the Galaxy. IAU Symp. № 136 / Ed. Morris M. Dordrecht etc., 1989. P. 37.
16. Reid M.J. // Annual Rev. Astron. and Astrophys. 1993. V. 31. P. 345.
17. Shuter W.L.H. // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1982. V. 199. P. 109.